

УДК 681.518

Малогабаритная система персональной навигации на базе неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой

Маринушкин П. С.^{1,*}, Нестеренко Т. Г.²

[*marinushkin_ps@mail.ru](mailto:marinushkin_ps@mail.ru)

¹Сибирский федеральный университет,
Красноярск, Россия

²Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, Томск, Россия

Рассмотрены особенности построения малогабаритной системы персональной навигации на базе неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой. Представлены алгоритмы обработки информации избыточного блока. Продемонстрированы результаты практической реализации малогабаритной системы персональной навигации на базе неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой. Приведен сравнительный анализ применения избыточной и неизбыточной систем.

Ключевые слова: избыточность, инерциальная навигация, микромеханические датчики, персональная навигация

Введение

В последнее время в связи с успехами в области микросистемных технологий возрос интерес к созданию персональных навигационных систем, построенных на инерциальных принципах [1 – 2]. Отличительными чертами таких систем являются универсальность, полная автономность и помехозащищённость [3]. К тому же инерциальные системы не требуют наличия дополнительной инфраструктуры и представляют возможность определения координат в условиях недоступности радионавигационных сигналов: в помещениях, «городских каньонах», густой лесистой местности и под землёй.

Задача определения параметров движения пользователей в персональных инерциальных навигационных системах (рис. 1) решается с помощью закрепляемых на теле пользователя блоков измерителей первичной инерциальной информации – кажущегося линейного ускорения и угловой скорости (акселерометров и гироскопов соответственно), изготавливаемых по технологии микроэлектромеханических систем (МЭМС), благодаря чему обеспечивается их низкая стоимость, малые массогабаритные показатели и низкое энергопотребление. На основе полученной совокупности инерциальной информации с

учетом начальных данных об исходной точке маршрута производится расчет скорости и местоположения пользователя.

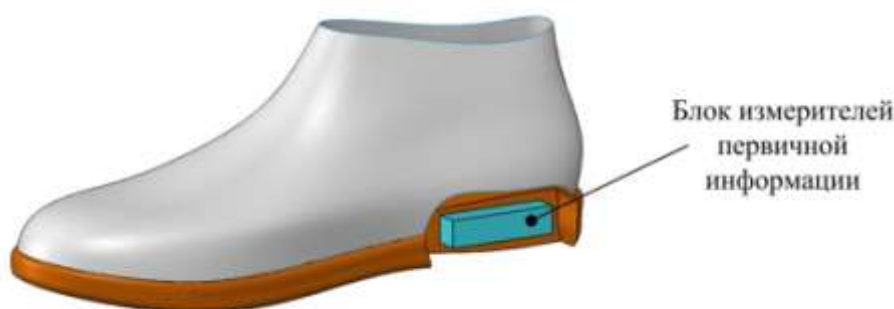


Рис. 1. Возможный вариант реализации инерциальной системы персональной навигации (блок инерциальных датчиков закреплен в подошве обуви)

Другим важным принципом построения пешеходных навигационных систем является использование метода коррекции по нулевой скорости (ZUPT, Zero velocity UPdaTe), подразумевающего обнаружение опорной фазы движения пользователя, во время которой его скорость $v = 0$, и периодическую корректировку показаний измерительного модуля в соответствующие моменты времени, благодаря чему становится возможным ограничить рост погрешностей при вычислении скорости и координат.

В то же время, практическая реализация возможности продолжительного автономного передвижения только на основе показаний МЭМС-датчиков при существующем уровне развития микросистемных технологий является непростой задачей. Дело в том, что основной проблемой МЭМС-датчиков является дрейф нуля, случайную составляющую которого довольно трудно скомпенсировать [4]. Это обстоятельство ставит проблему улучшения качества навигационной информации в инерциальных системах персональной навигации. В связи с этим представляют интерес задачи разработки и исследования структурно избыточных измерительных блоков с неортогональной ориентацией их осей чувствительности как возможного направления решения указанной проблемы.

1. Структурная избыточность как средство повышения точности инерциальных систем персональной навигации

К эффективным направлениям, позволяющим существенно повысить надежность и точность инерциальных систем персональной навигации, относится использование структурно избыточных блоков измерителей первичной инерциальной информации с неортогональной ориентацией их осей чувствительности [4 – 10]. Положительный эффект от неортогональности и избыточности достигается за счет того, что поскольку случайный дрейф датчиков может быть как положительным, так и отрицательным, то при суммировании проекций дрейфов на оси базовой системы координат получается уменьшение общего

дрейфа измерений (при условии оптимальной ориентации осей чувствительности датчиков) [4].

Теоретические основы и вопросы практической реализации структурно избыточных инерциальных измерительных модулей (ИИМ) в навигационных системах ранее уже становились предметом анализа отечественных и зарубежных ученых [5 – 10]. Однако, первоначально основной целью использования структурной избыточности являлось не повышение точности, а обнаружение и изоляция сбоев измерителей первичной инерциальной информации и, соответственно, повышение отказоустойчивости навигационных систем. Специфика задачи разработки структурно избыточных ИИМ применительно к малогабаритным системам персональной навигации заключается в том, что резервирование измерительных модулей как средство повышения надежности нецелесообразно, т.к. это привело бы к неоправданному усложнению и повышению стоимости систем персональной навигации, а на первый план выступают требования к точности определения местоположения.

2. Способы реализации структурной избыточности измерительного блока

В известной литературе [5 – 10] описан ряд подходов к реализации структурной избыточности измерителей. Первый подход состоит в использовании избыточного числа самих измерительных блоков (рис. 2, а). При практической реализации этого подхода возникает необходимость применения высокопроизводительного процессорного модуля, что усложняет и удорожает навигационную систему.

Второй подход заключается в использовании избыточного числа датчиков инерциальной информации в составе одного измерительного модуля (рис. 2, б) и отличается простотой реализации. При этом вычислительная нагрузка на процессорный модуль и требования к пропускной способности канала передачи данных значительно ниже, чем в первом случае. В связи с этим представляется целесообразным в персональных навигационных системах отдать предпочтение второму варианту реализации структурной избыточности измерителя.

Что касается непосредственно конструктивных схем избыточных инерциальных измерительных блоков, то существует большое разнообразие конфигураций: с основаниями в виде тетраэдра, октаэдра, икосаэдра, додекаэдра и др. [5 – 10]. Выбор конкретной схемы определяется её соответствием условиям эксплуатации и габаритам навигационной системы, показателями точности, стоимостью, технологичностью и т.д. С практической точки зрения наиболее предпочтительной конфигурацией для использования в малогабаритных системах персональной навигации является конструкция ИИМ в виде усеченной правильной четырехугольной пирамиды (рис. 3, а), на боковых гранях которой размещены комбинированные микромеханические датчики (гироскоп, акселерометр, магнитометр) первичной информации, реализующие три измерительных канала: кажущегося ускорения, угловой скорости и напряженности магнитного поля. Данная конфигурация ИИМ представля-

ется наиболее технологичной и может быть реализована в миниатюрном исполнении с помощью существующих микроэлектронных технологий [11].

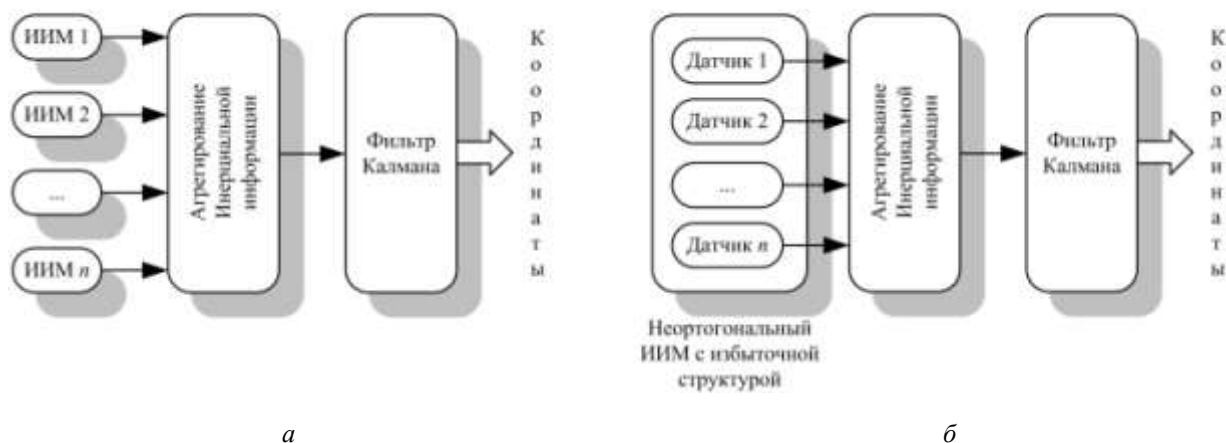


Рис. 2. Варианты реализации структурной избыточности измерителей: *а* – система содержит избыточное число ИИМ; *б* – система содержит одинарный ИИМ с избыточным количеством датчиков

Система координат такого измерительного модуля (рис. 3, б) образована тремя взаимно перпендикулярными осями координат X , Y и Z , пересекающимися в точке O . Ось Z совпадает с осью симметрии пирамиды, а оси X и Y лежат в плоскости её основания. Оси чувствительности 4-х комбинированных датчиков направлены под углом α к плоскости основания перпендикулярно боковым граням пирамиды и развернуты друг относительно друга на углы, кратные 2β . Именно углы α и β , определяющие взаимную ориентацию осей чувствительности комбинированных датчиков являются теми ключевыми параметрами при выборе конфигурации измерительного модуля, от которых зависят ошибки определения составляющих измеряемых векторов кажущегося ускорения, угловой скорости и напряженности магнитного поля.

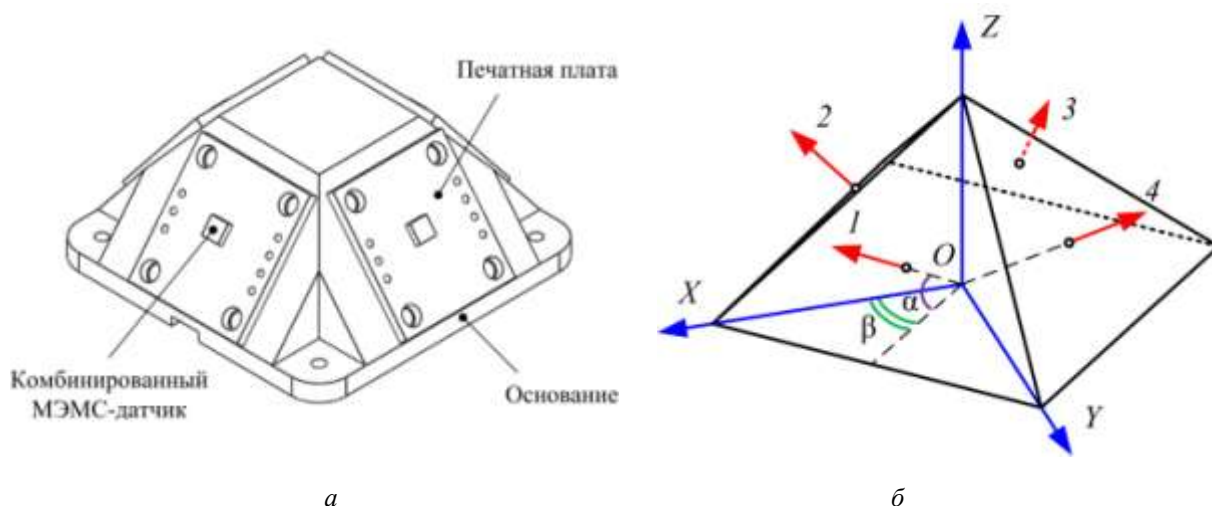


Рис. 3. Структурно избыточный блок инерциальных микромеханических датчиков: *а* – расположение датчиков в блоке, *б* – система координат избыточного блока

3. Математическая модель неортогонального измерительного модуля с избыточной структурой

Имея в виду построить математическую модель одного из измерительных каналов рассматриваемого избыточного измерительного блока, например канала измерения кажущегося ускорения, обозначим единичный вектор ориентации оси чувствительности i -го акселерометра через V_i . Тогда, в соответствии с рис. 3, б, можно записать:

$$V_i = i \cos \alpha \cos \beta + j \cos \alpha \sin \beta + k \sin \alpha \quad (1)$$

где i, j и k – взаимно перпендикулярные единичные вектора по осям OX, OY и OZ связанной с ИИМ системы координат.

Используя (1), матрицу измерений \mathbf{H} ($\mathbf{H} \in R^{4 \times 3}$), преобразующую выходные сигналы акселерометров из системы координат, связанной с датчиками, в систему координат измерительного блока, можно записать следующим образом:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\cos(\beta) & \cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\cos(\beta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) \\ \cos(\alpha)\cos(\beta) & -\cos(\alpha)\sin(\beta) & \sin(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Неизвестные углы α и β в (2), определяющие ориентацию осей чувствительности датчиков в блоке, выбираются исходя из следующих соображений. Угол β для рассматриваемой геометрической конфигурации избыточного блока заданного числа датчиков следует принять равным 45° , что обеспечит равномерное расположение датчиков в пространстве и одинаковую точность определения всех компонентов измеряемого вектора вдоль разных осей.

Критерием оптимального выбора угла α служит минимум суммы дисперсий ошибок оценки компонент измеряемого вектора [5], т.е. минимум следа (суммы элементов главной диагонали) ковариационной матрицы ошибок оценки компонент измеряемого вектора \mathbf{P} :

$$\mathbf{P} = \sigma^2 (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma_x^2}{2\cos(\alpha)^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_y^2}{2\cos(\alpha)^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_z^2}{4\sin(\alpha)^2} \end{bmatrix},$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – среднеквадратические отклонения ошибок измерений, обусловленные шумами датчиков (считая датчики равноточными, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \sigma$).

Тогда критерий оптимальности выбора угла α запишется в виде:

$$\text{trace}(\mathbf{P}_\Sigma) = \sigma^2 \left(\frac{1}{\cos(\alpha)^2} + \frac{1}{4 \cdot \sin(\alpha)^2} \right) \rightarrow \min,$$

Графическое изображение соответствующей целевой функции представлено на рис. 4.

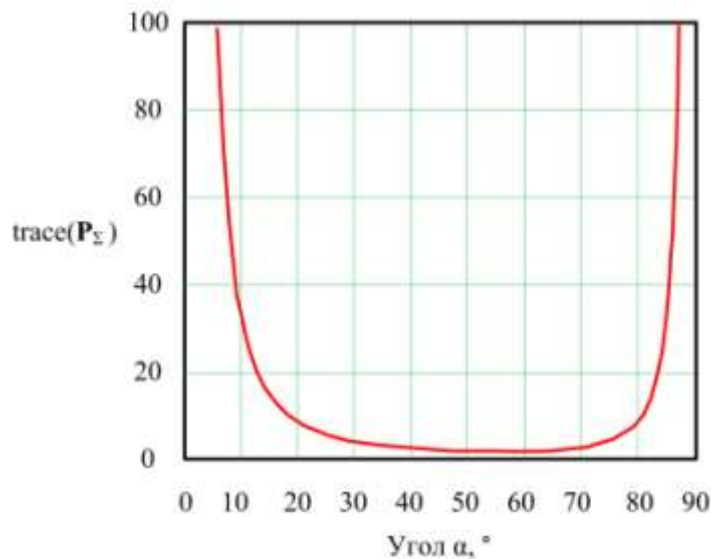


Рис. 4. Зависимость следа ковариационной матрицы \mathbf{P} от величины угла α

Из рис. 4 можно определить, что оптимальная величина угла наклона осей чувствительности датчиков к основанию α для рассматриваемого избыточного блока составляет 35,264 градуса. Это означает, что при данной ориентации осей чувствительности дисперсия ошибок по осям OX , OY и OZ уменьшится в $2\cos(\alpha)^2$, т.е. в $\sqrt{1.333}$ раз, а соответствующая матрица измерений \mathbf{H} примет следующий вид:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ -\frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3}}{3} & -\frac{\sqrt{3}}{3} & \frac{\sqrt{3}}{3} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Далее для рассматриваемой избыточной схемы (рис. 3) с общим числом акселерометров, равным 4, связь вектора состояния \mathbf{x} с измерениями \mathbf{z} можно выразить с помощью следующей модели измерений (наблюдений):

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v}, \quad (4)$$

где \mathbf{z} – вектор выходных сигналов акселерометров ($\mathbf{z} \in R^{4 \times 1}$); \mathbf{x} – компоненты входного вектора кажущегося ускорения на оси измерительного модуля ($\mathbf{x} \in R^3$); \mathbf{v} – вектор случайных помех, сопровождающих измерения ($\mathbf{v} \in R^4$), имеющий нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей \mathbf{R} (матрицы интенсивностей шумов измерений), характеризующей точность измерений.

Вектора модели (6) имеют вид:

$$\mathbf{x} = [f_x \quad f_y \quad f_z]^T, \mathbf{z} = [z_1 \quad \dots \quad z_4]^T, \mathbf{v} = [\eta_1 \quad \dots \quad \eta_4]^T,$$

где f_x, f_y, f_z – кажущиеся ускорения вдоль осей OX , OY и OZ связанной с ИИМ системы координат; z_i – выходной сигнал i -го акселерометра ($i = 1, 2, 3, 4$); η_i – ошибка i -го датчика.

Рассмотренная модель является единой для всех измерительных каналов (кажущегося ускорения, угловой скорости и напряженности магнитного поля). Т.е. матрицы преобразования выходных сигналов гироскопов и магнитометров из системы координат, связанной с датчиками, в систему координат измерительного блока, будут иметь вид, аналогичный (3), а вектор \mathbf{x} в (4) будет представлен проекциями угловых скоростей на оси измерительного модуля $[\omega_x \ \omega_y \ \omega_z]^T$ для канала измерения угловой скорости и проекциями напряженности магнитного поля $[H_x \ H_y \ H_z]^T$ для канала измерения напряженности магнитного поля.

4. Функциональный алгоритм обработки информационных сигналов избыточного измерительного блока

Задача обработки информации инерциального измерительного блока может быть разбита на 2 этапа: 1) оценка ортогональных составляющих измеряемых векторов в системе координат измерительного модуля; 2) решение навигационной задачи.

Задача нахождения оценки компонент векторов кажущегося ускорения, угловой скорости и напряженности магнитного поля, под которой понимается пересчет составляющих измеряемых векторов с осей чувствительности датчиков в систему координат измерительного модуля, сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (4). Но, поскольку число уравнений в системе (4) больше, чем число неизвестных, то она является переопределенной и её точного решения не существует. Поэтому для решения данной системы можно воспользоваться методом наименьших квадратов.

В соответствии с основной идеей этого метода систему (4) можно «решить» в смысле выбора такого вектора \mathbf{x} , чтобы минимизировать «расстояние» между векторами $\mathbf{H}\mathbf{x}$ и \mathbf{z} . Схема решения системы (4) методом наименьших квадратов состоит из нахождения матрицы, обратной матрице измерений \mathbf{H} и умножения полученного результата на вектор измерений \mathbf{z} . Получившийся результат и даст вектор-столбец значений неизвестных \mathbf{x} .

$$\mathbf{x} = \mathbf{H}^* \mathbf{z},$$

где \mathbf{H}^* – псевдообратная матрица (обратная матрица Мура-Пенроуза), которая вычисляется по формуле:

$$\mathbf{H}^* = (\mathbf{H}^T \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T.$$

Однако, метод наименьших квадратов накладывает серьезные ограничения на подавляемые шумы (нулевое среднее, гауссов шум, равные дисперсии шумов в разных измерительных каналах) [4]. Несколько более сложным является алгоритм метода взвешенных наименьших квадратов:

$$\mathbf{x} = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{z},$$

где \mathbf{R} – ковариационная матрица шумов измерений (матрица интенсивностей шумов измерений).

Элементами матрицы \mathbf{R} являются дисперсии ошибок измерения компонент вектора состояния, которые определяются в результате экспериментальных измерений статических шумов при неподвижном положении пешехода [12]. Чем больше значения элементов

\mathbf{R} , тем больше зашумлены измерения и тем ниже их информативность. В случае использования равноточных датчиков со среднеквадратическим отклонением, равным σ_v , ковариационная матрица \mathbf{R} (для одного из измерительных каналов) будет иметь следующий вид:

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{v}\mathbf{v}^T] = \begin{bmatrix} \sigma_v^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_v^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_v^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_v^2 \end{bmatrix},$$

где $E\{\}$ – символ математического ожидания.

Второй этап алгоритма – решение навигационной задачи заключается в том, чтобы по измеренным ускорениям, вычислить изменения положения пользователя относительно фиксированных точек на местности.

Для случая использования направляющих косинусов [13] алгоритм решения навигационной задачи для рассматриваемой навигационной системы может быть следующим. Исходной информацией являются оценки компонент векторов кажущегося ускорения \mathbf{f}^b , угловой скорости $\boldsymbol{\omega}^b$ и напряженности магнитного поля \mathbf{m}^b , полученные на предыдущем этапе. По угловым скоростям рассчитываются параметры ориентации \mathbf{C}_n^b , которые затем используются для преобразования вектора кажущегося ускорения из связанной с объектом в навигационную систему координат. После представления вектора \mathbf{f}^b в навигационной системе координат удаляется гравитационная компонента (вектор \mathbf{g}), чтобы получить составляющие вектора ускорения \mathbf{f}^n , обусловленные передвижением пользователя. Последующее интегрирование навигационных данных позволяет сформировать базовое навигационное решение. Параллельно реализуется алгоритм детектирования опорной фазы ходьбы. В случае детектирования опорной фазы выполняется коррекция базового навигационного решения. Для этого полученная совокупность инерциальной информации и магнитометрических измерений поступает в расширенный фильтр Калмана, в результате работы которого вычисляются оценка текущих ошибок навигационной системы в определении координат, скоростей и углов ориентации $\delta\mathbf{x} = [\delta\mathbf{r} \ \delta\mathbf{v} \ \delta\boldsymbol{\phi}]^T$. Далее на основе полученных поправок корректируется базовое навигационное решение (рис. 5).

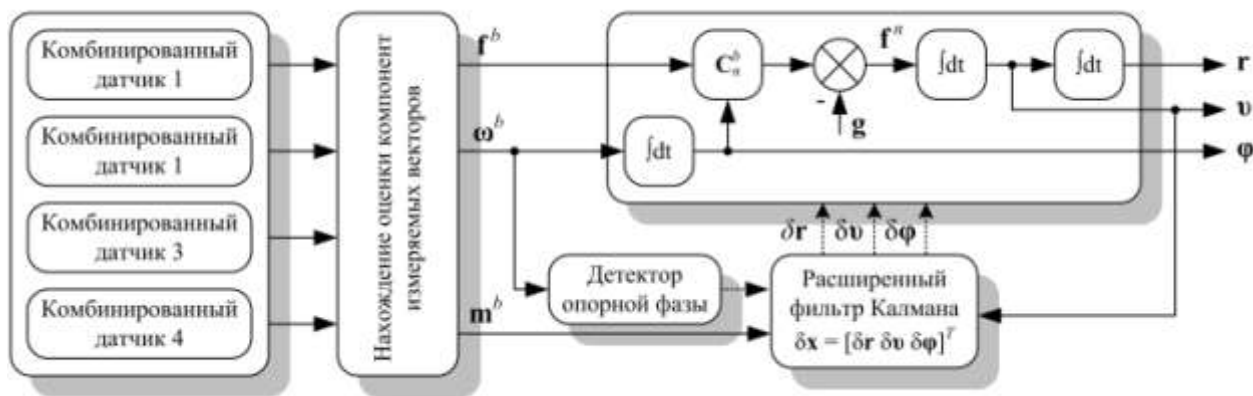


Рис. 5. Алгоритм обработки избыточной информации блока

5. Анализ точностных характеристик и функциональных возможностей разработанной навигационной системы

Полученные результаты теоретических исследований послужили основой для создания функционального прототипа инерциальной пешеходной навигационной системы, реализованного в виде аппаратно-программного комплекса.

Основу аппаратной части комплекса составляют измерительный (рис. 6) и процессорный модули. Прототип инерциального измерительного модуля (в макро-исполнении) включает в себя четыре измерительных датчика InvenSense MPU9250 (акселерометр, гироскоп и магнитометр в едином корпусе). Измерительный модуль закрепляется на обуви пользователя и соединяется с процессорным модулем по беспроводному интерфейсу. Процессорный модуль, представленный отладочной платой STM32F4 DISCOVERY, отвечает за сбор данных, их предварительную обработку и вычисление навигационного решения. Отображение текущего местоположения осуществляется находящимся у пользователя ноутбуком. Разработанное в соответствии с представленным алгоритмом программное обеспечение на языке C# осуществляет предварительную обработку информационных сигналов избыточного блока, комплексирование потоков данных инерциальных и магнитометрических измерений и позволяет определять параметры движения пользователя.

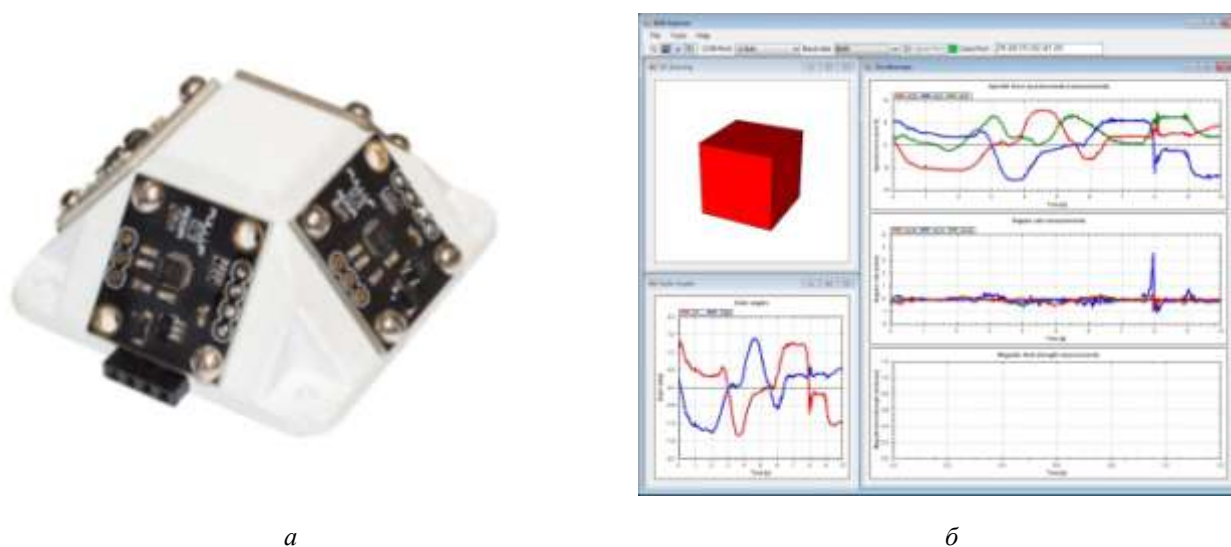


Рис. 6. Аппаратно-программный комплекс персональной навигации: *а* – разработанный прототип неортогонального блока инерциальных датчиков с избыточной структурой, *б* – интерфейс программы обработки информационных сигналов избыточного блока

Оценка работоспособности представленных решений выполнялась в ходе серии тестов, включавших ходьбу со средней скоростью по замкнутой траектории общей протяжённостью 170 м (рис. 7). Расчёт траекторий движения проводился без привлечения магнитометрической информации (только данные гироскопов и акселерометров).

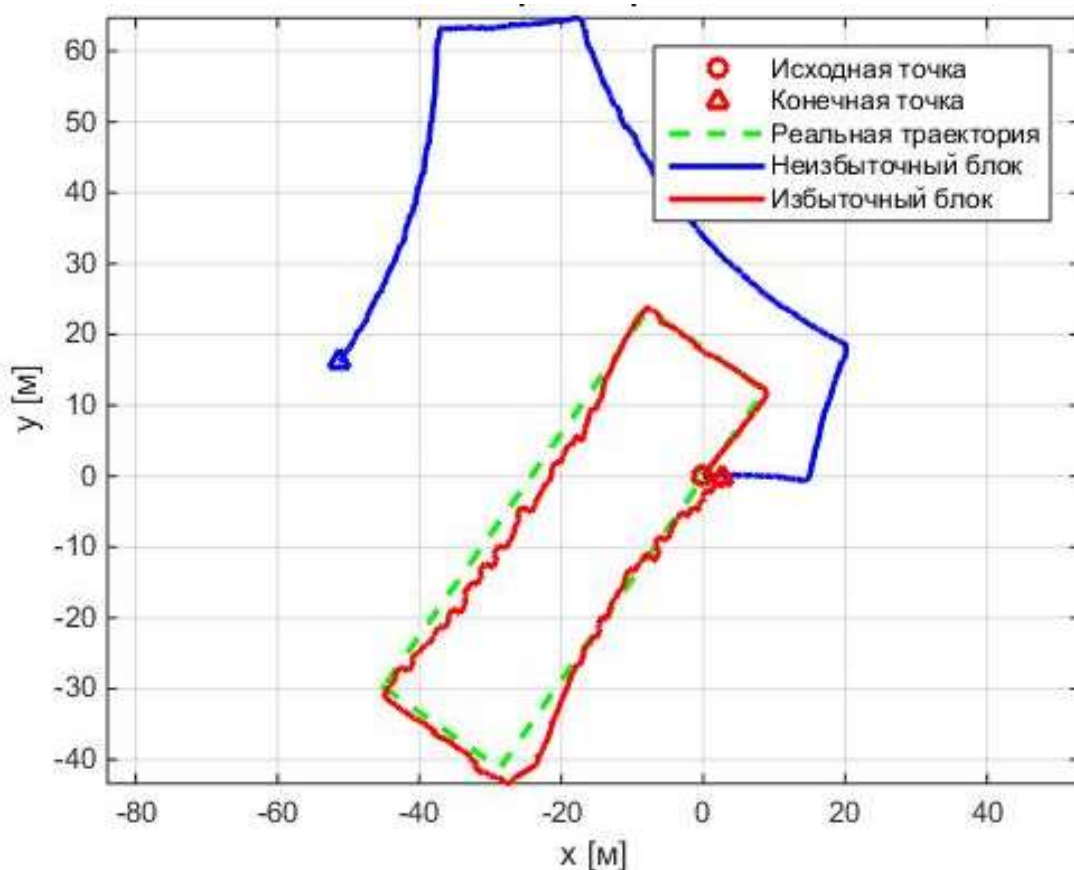


Рис. 7. Пример типичных тестовых результатов

Погрешность выработки оценок навигационных параметров определялась точностью возвращения в исходное положение. Результаты экспериментов (табл. 1) демонстрируют повышение точности выработки оценок навигационных параметров с помощью разработанного неортогонального инерциального измерительного блока с избыточной структурой по сравнению с навигационной системой, использующей минимально необходимое число датчиков с ортогонально расположенными осями чувствительности [12]. Указанные в таблице относительные погрешности возвращения в исходное положение (в плоскости xy) $\epsilon_{\text{дрейф}}$ и определения расстояния $\epsilon_{\text{расст.}}$ рассчитывались как:

$$\epsilon_{\text{дрейф.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}}{L},$$

$$\epsilon_{\text{расст.}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{\left(\frac{L_{\text{изм.}} - L}{L} \right)^2},$$

где Δx , Δy – погрешности возвращения в исходное положение по осям X и Y соответственно; i – порядковый номер теста; N – число тестов; L – истинная длина траектории; $L_{\text{изм.}}$ – длина пройденного пути, рассчитанная по результатам измерений.

Таблица 1. Результаты экспериментов

	$\varepsilon_{\text{дрейф.}}, \%$	$\varepsilon_{\text{расст.}}, \%$
Навигационная система на базе избыточного блока измерителей	2,418	1,794
Навигационная система на базе неизбыточного блока измерителей	34,101	4,494

Заключение

В ходе натурных испытаний разработанной инерциальной системы персональной навигации установлено, что ошибка определения местонахождения не превышает 2,5 %. Анализ полученных результатов дает основание сделать вывод, что использование структурно избыточного блока измерителей первичной инерциальной информации с неортогональной ориентацией их осей чувствительности, позволяет получить удовлетворительную для решения практических задач точность расчёта траектории движения даже при использовании инерциальных МЭМС-датчиков потребительского класса. Разработанные технические и алгоритмические решения могут быть реализованы в индивидуальной навигационной аппаратуре гражданского и специального применения.

Авторы выражают благодарность И. А. Подшивалову за помощь в изготовлении прототипа инерциальной пешеходной навигационной системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-38-50039.

Список литературы

1. Fischer C., Sukumar P.T., Hazas M. Tutorial: implementing a pedestrian tracker using inertial sensors // IEEE Pervasive Computing. 2013. Vol. 12. No. 2. Pp.17–27.
DOI: [10.1109/MPRV.2012.16](https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.16)
2. J.O. Nilsson, I. Skog, P. Handel, K. Hari. Foot-mounted INS for everybody – an open-source embedded implementation // Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (April 2012), pp. 140-145.
DOI: [10.1109/PLANS.2012.6236875](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236875)
3. Горенштейн И.А., Шульман И.А. Инерциальные навигационные системы. М.: Машиностроение. 1970. 232 с.
4. Неортогональная БИНС для малых БПЛА. Хабрахабр: веб-сайт. Режим доступа: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513> (дата обращения 01.04.2016).
5. Алешкин М.В. Математические модели, методы и алгоритмы обработки избыточной информации измерительного блока // Интернет и инновации: сб. трудов Междунар. конф. Саратов: СГТУ, 2008. С. 377–380.
6. J. Cheng, J. Dong, R.J. Landry, D.A. Chen. Novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensors based on the orthogonal rotation method // Sensors. 2014. Vol. 14(8). Pp. 13661–13678. DOI: [10.3390/s140813661](https://doi.org/10.3390/s140813661)

7. A. Waegli, S. Guerrier, J. Skaloud. Redundant MEMS-IMU integrated with GPS for performance assessment in sports // Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION. Pp. 1260–1268. DOI: [10.1109/PLANS.2008.4570079](https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570079)
8. Seong Yun Cho, Chan Gook Park. A calibration technique for a redundant IMU containing low-grade inertial sensors // ETRI Journal. 2005. Vol. 27. No. 4. Pp. 418–426. DOI: [10.5139/JKSAS.2004.32.10.053](https://doi.org/10.5139/JKSAS.2004.32.10.053)
9. J.O. Nilsson, I. Skog, P. Handel. An open-source multi inertial measurement unit (MIMU) platform // Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014 International Symposium on. Pp. 1–4. DOI: [10.1109/ISISS.2014.6782523](https://doi.org/10.1109/ISISS.2014.6782523)
10. J. Bancroft and G. Lachapelle. Data fusion algorithms for multiple inertial measurement units // Sensors. 2011. Vol. 12. Pp. 3720–3738. DOI: [10.3390/s110706771](https://doi.org/10.3390/s110706771)
11. S.A. Zotov, M.C. Rivers, A.A. Trusov, A.M. Shkel. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit // IEEE Sensors Journal. 2011. Vol. 11. No. 11. Pp. 2780–2789. DOI: [10.1109/JSEN.2011.2160719](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2160719)
12. Маринушкин П.С., Бахтина В.А., Подшивалов И.А., Стукач О.В. Вопросы разработки инерциальных пешеходных навигационных систем на основе МЭМС-датчиков // Наука и Образование. МГТУ им. Баумана. Электрон. журн. 2015. № 6. С. 157–173. DOI: [10.7463/0615.0786740](https://doi.org/10.7463/0615.0786740)
13. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем: учебное пособие / под ред. д.т.н. Распопова В.Я. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2009. 280 с.

Miniature Personal Navigation System Based on Non-orthogonal Redundant Inertial Measurement Unit

P.S. Marinushkin^{1,*}, T.G. Nesterenko²

[*marinushkin_ps@mail.ru](mailto:marinushkin_ps@mail.ru)

¹Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University,
Tomsk, Russia

Keywords: redundancy, inertial navigation, micromechanical (MEMS) sensors, personal navigation

The benefits of the structurally redundant measurement instruments of primary inertial data allow a significantly improved accuracy and reliability of navigation measurements and open up new prospects for further improvement of the miniature personal navigation systems. In this regard, the article deals with the practical implementation of the personal navigation system employing the non-orthogonal inertial measurement unit with redundant structure. In particular, it proposes the architecture of the personal navigation system based on the redundant measurement unit. By analyzing the possible options to implement instruments of structural redundancy and their construction arrangements, the article gives justification for a choice of the configuration of the inertial measurement unit. Then considers mathematical modeling of the measurement channels of a redundant inertial measurement unit. Suggests an algorithm for data processing of the measurement unit. It consists of two phases: 1) evaluation of the orthogonal components of measured vectors in the system of coordinates of the measurement module 2) navigation task solution. The effectiveness of the proposed technical solutions and developed algorithms to estimate navigation parameters was evaluated during experimental studies using a specially designed functional prototype of the inertial pedestrian navigation system, implemented as a hardware-software complex. The experimental studies have demonstrated the improved accuracy of navigation parameters estimated by the non-orthogonal redundant inertial measurement unit against a navigation system that uses the minimum number of sensors with orthogonally arranged axes of sensitivity. The developed technical and algorithmic solutions can be used in the personal navigation equipment for special-purpose and civil applications.

References

1. Fischer C., Sukumar P.T., Hazas M. Tutorial: implementing a pedestrian tracker using inertial sensors. *Pervasive Computing, IEEE*, 2013, vol. 12, no. 2, pp. 17–27.
DOI: [10.1109/MPRV.2012.16](https://doi.org/10.1109/MPRV.2012.16)

2. Nilsson J.O., Skog I., Handel P., Hari K. Foot-mounted INS for everybody – an open-source embedded implementation. *Proceedings of the 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (April 2012)*, pp. 140-145. DOI: [10.1109/PLANS.2012.6236875](https://doi.org/10.1109/PLANS.2012.6236875)
3. Gorenshtein I.A., Shul'man I.A. *Inertsial'nye navigatsionnye sistemy* [Inertial navigation systems]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1970. 232 p. (in Russian).
4. *Neortogonal'naya BINS dlya malyh BPLA* [Non-orthogonal Strapdown Inertial Navigation System for Small Unmanned Aerial Vehicles]. Habrahabr: web-site. Available at: <http://special.habrahabr.ru/kyocera/p/114513/> (accessed 01.04.2016). (in Russian).
5. Aleshkin M. [Mathematical models, methods and algorithms of the measurement unit redundant information processing]. *Internet i innovatsii: sbornik trudov Mezhdunarodnoj konferentsii* [Internet and Innovations: Proc. Int. Conf.]. Saratov, 2008. pp. 377–380 (in Russian).
6. Cheng J., Dong J., Landry R.J., Chen D.A. Novel optimal configuration form redundant MEMS inertial sensors based on the orthogonal rotation method. *Sensors*, 2014, vol. 14(8), pp. 13661–13678. DOI: [10.3390/s140813661](https://doi.org/10.3390/s140813661)
7. Waegli A., Guerrier S., Skaloud J. Redundant MEMS-IMU integrated with GPS for performance assessment in sports. *Position, Location and Navigation Symposium, 2008 IEEE/ION*, 2008, pp. 1260–1268. DOI: [10.1109/PLANS.2008.4570079](https://doi.org/10.1109/PLANS.2008.4570079)
8. Seong Yun Cho, Chan Gook Park. A calibration technique for a redundant IMU containing low-grade inertial sensors. *ETRI Journal*, 2005, vol. 27, no. 4, pp. 418–426. DOI: [10.5139/JKSAS.2004.32.10.053](https://doi.org/10.5139/JKSAS.2004.32.10.053)
9. Nilsson J.O., Skog I., Handel P. An open-source multi inertial measurement unit (MIMU) platform. *Inertial Sensors and Systems (ISISS), 2014 International Symposium on*, 2014, pp.1–4. DOI: [10.1109/ISISS.2014.6782523](https://doi.org/10.1109/ISISS.2014.6782523)
10. Bancroft J., Lachapelle G. Data fusion algorithms for multiple inertial measurement units. *Sensors*. 2011, vol. 12, pp. 3720–3738. DOI: [10.3390/s110706771](https://doi.org/10.3390/s110706771)
11. Zotov S.A., Rivers M.C., Trusov A.A., Shkel A.M. Folded MEMS pyramid inertial measurement unit. *Sensors Journal, IEEE*, 2011, vol. 11, no. 11, pp. 2780–2789. DOI: [10.1109/JSEN.2011.2160719](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2160719)
12. Marinushkin P.S., Bakhtina V.A., Podshivalov I.A., Stukach O.V. Design Issues for MEMS-Based Pedestrian Inertial Navigation Systems. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Bauman = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2015, no. 6, pp. 157–173. (in Russian). DOI: [10.7463/0615.0786740](https://doi.org/10.7463/0615.0786740)
13. Matveev V.V., Raspopov V.Ya. *Osnovy postroeniya besplatformennykh inertsial'nykh navigatsionnykh sistem* [Building fundamentals of strapdown inertial navigation systems]. St. Petersburg, RF State research Center “Concern CSRI Elektropribor” Publ., 2009. 280 p. (in Russian).